



TITLE:

Lightning in Protoplanetary Disks(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Muranushi, Takayuki

CITATION:

Muranushi, Takayuki. Lightning in Protoplanetary Disks. 京都大学, 2013, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2013-07-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r12767>

RIGHT:

京都大学	博士 (理学)	氏名	村主 崇行
論文題目	Lightning in Protoplanetary Disks (原始惑星系円盤における雷現象)		
(論文内容の要旨)			
<p>太陽系を始めとする惑星系の起原に対しては、いわゆる京都モデルが有力な説となっている。このモデルでは太陽質量の 10^{-2} 倍くらいの質量を持つディスク状の原始太陽系星雲中で約 1 % をしめる金属から質量が 10^{18} g 程度の微惑星が数多く形成される。微惑星は集積合体して地球型惑星を作り、木星領域ではさらに水素ガスを集めて木星型惑星を作るとというのがシナリオである。ところが、このモデルでは微惑星がそもそも形成可能なのか？ 金属を主体とするダストがメートルサイズになった時に太陽に落下してしまうのではないかと？ という問題があった。特に、太陽の形成に関しては重要な役割を果たした磁場の影響が惑星形成に於いて、いかなる役割を果たしたかは未解明な問題であった。</p> <p>磁場の影響を調べるには原始太陽系星雲中でのイオン化率を評価する必要があるが、温度が低く密度が高いため電離源は主に宇宙線である。電荷を担うのは電子、イオン、正負の電荷を持ったダストである。ダストは一般には種々の大きさのものがあるが、簡単のためサイズが 10^2 cm の大きなダストと 10^{-2} cm の小さなダストのみからなるとし、それらの衝突と電荷の交換の過程を取り入れて電荷状態を求める基礎方程式を立てた。与えられた密度に対してイオン、電子、大きなダスト、小さなダストの電荷状態を数値計算で求めた結果、密度によって 4 つの異なる phase が存在することが解った。それらは、密度が低い方から① Ion-electron plasma phase② Ion-dust-plasma phase③ Charge-up phase④ Dust-phaseであるが、特に④の phase ではダストがほとんどの電荷を担う。その結果、地球上の積乱雲中と同様な雷が原始太陽系星雲でも密度によって起こりうることを解った。すなわち、ダストの電荷が大きくなったため、強い電場が発生し、電子が平均自由行程を進む間に原子を電離するのに十分なエネルギーを得て、次々に電離が進む。いわゆる雷という現象が起こる。</p> <p>多くの降着円盤ではMRI(Magneto Rotational Instability)によって乱流が発生すると考えられているが、原始太陽系星雲では温度が低く密度が高いため電離度が低く磁場と流体ガス、ダストとの結合が弱くてdead zoneが大半を占めると考えられていた。しかし、上で述べた雷が発生すれば電離度が上がり磁場と流体が十分結合してMRIが起こり乱流状態になることが期待出来る。乱流状態であるとダストの衝突合体、微惑星の太陽への落下等の問題に大きな影響を与える。そこで、電場が大きくなると雷が起こる現象を抵抗が非線形に振る舞うと言う扱いで近似する。基礎方程式は非線形な抵抗を持ったResistive MHD(Magneto HydroDynamics)であり、系を特徴つけるパラメータはガス圧と磁気圧の比 β、磁気レイノルズ数 R_M と抵抗が非線形になるcriticalな電流 J_{crit} である。与えられたパラメータに対して乱流状態又は層流状態から空間 3 次元の数値シミュレーションを実行した。その結果パラメータに応じて 3 つの最終状態になることが判明した。すなわち、層流状態と乱流状態の両方の初期条件に対してMRIが起こるactive zoneとMRIが起きないdead zone、それから層流状態からはMRIが起こらないが乱流状態からはMRIが起きる sustained zoneである。この結果を我々の太陽系を作った原始太陽系星雲に適用すると、初期にはsustained zone はほんの一部であるが、その後ガスが少なくなった後期ではほとんどの部分がsustained zoneになることが明らかになった。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

積乱雲中では上昇気流に伴って水分が氷粒子になり、それらが落下する時の他の粒子との衝突で摩擦電気が起こり、その結果強い電場が発生して雷が生ずると考えられているが、同様の過程が原始太陽系星雲でも起こる可能性があるという申請者の発見は新しい知見である。与えられた密度に対して、4つのphaseが存在することを数値計算で示し、特に雷の発生と関係する3番目と4番目のphaseは新しい発見である。申請者は各phaseの解を数値的だけでなく解析的にも近似的に求め、それらが数値解を良く再現することを示している。さらには、原始太陽系星雲中での雷現象を地上の光学望遠鏡、電波望遠鏡やX線衛星で観測できる可能性を議論している。具体的には300光年の距離で雷が発生すると200GHzのミリ波帯では最大1Jyとなるので、効率が 10^{-4} でも0.1mJyとなり、ALMA (Atacama Large Millimeter Array) で検出可能である。また、隕石中のコンドリュールの加熱源としても雷の可能性を指摘している。このように、観測可能性や隕石の起源とも関わる内容は高く評価出来る。

次に、雷の効果を取り入れて原始太陽系星雲中での resistive MHD の空間3次元数値シミュレーションを実行して、原始太陽系星雲は3つの zone に分かれることを見いだしている。特にMRIがsustainedされるzoneが存在することは新しい知見である。申請者は3つのzoneのパラメータ依存性を詳細に調べることにより、差動回転によって得られるエネルギーがジュール加熱より大きいとMRIが起こると言う物理的な理由を見いだしている。得られた結果は原始太陽系星雲に適用が可能で、今後、雷の効果も考えての微惑星形成過程や微惑星の衝突合体の研究に広がる可能性のある成果であるので、この非線形 resistive MHD 計算の結果は高く評価できる。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認められるものである。

また、平成25年4月23日 主論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。